第46卷 第3期
2023年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 3
Mar. 2023

河套平原土壤风蚀风险评估

吴盈盈[1,2]， 王振亭[1]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000；
2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要： 土壤风蚀是沙漠化的首要环节，评估其发生的可能性和潜在风险对区域风蚀防治具有重要意义。现有风险评估模型缺乏表征土壤可蚀性的力学参数。鉴于此，通过野外实测土壤硬度和抗剪强度，比较了河套平原不同土地利用类型的土壤可蚀性，采用抗剪强度、气候条件、地形地貌和植被特征等影响因子，建立了土壤风蚀风险评估模型。结果表明：(1) 沙地土壤硬度和抗剪强度的中值分别为2.05 kg·cm^{-2}和10.00 kPa，远小于其他土地利用类型，土壤可蚀性极高。(2) 土壤风蚀风险具有明显的空间分异性，在空间上大致呈“西部、南缘高，中、东部较低”的特征，风蚀风险以轻险型和危险型为主，土壤可蚀性和植被盖度是影响土壤风蚀风险的重要因素。(3) 风蚀极险型和强险型约占研究区总面积的27.51%，主要分布在磴口县大部、黄河两岸、托克托县以及乌拉特前旗境内的乌梁素海东部，该区沙源物质丰富、风沙危害剧烈，是土壤风蚀的重点防护区域。

关 键 词： 河套平原；土壤风蚀；风险评估；抗剪强度；模糊逻辑

文章编号： 1000－6060(2023)03－0418－10(418～0427)

作为土地沙漠化的首要环节和重要组成部分[1-2]，土壤风蚀是指风力作用导致表土物质脱离原空间位置的过程[3]，包括颗粒起动、运输和沉积，其中较大颗粒以蠕移为主，较小颗粒以跃移、悬移为主。土壤风蚀会导致富含营养物质和有机质的细颗粒流失，土壤肥力下降，农业生产力降低，甚至引起沙尘暴灾害，严重威胁着干旱地区人类健康和生态安全。在我国北方干旱、半干旱和干旱亚湿润地带分布着范围广大的沙漠、沙地、草地和季节性裸露农田，干燥多风与降水稀少的气候特点使得该区域土壤风蚀问题严重。

土壤(风蚀)可蚀性指风蚀过程中土壤对于风力引起的剥离和搬运的敏感程度[4]，表达了表层土壤的易风蚀性[3]。早期的研究中[4]，土壤可蚀性评价指标多用团聚体粒径分布、地表粗糙度、土壤可蚀性颗粒含量等间接指标与临界风速、输沙率等直接指标来表征。例如，李晓佳等[5]根据土壤机械组成、有机碳和电导率等理化性质，分析林地、草地、耕地等不同土地利用类型土壤的潜在可蚀性。实际上，土壤风蚀经验统计模型还构建了以土壤质地、碳酸钙含量和有机质含量等为自变量的土壤可蚀性指标。然而，此类模型大多缺乏普适性，未充分重视对风蚀过程的力学研究。为此，邹学勇等[3]借鉴水蚀研究思路，提出使用表土抗剪强度来表征土壤的抗风蚀能力。李驰等[6]则直接用抗剪强度分析沙漠路基边坡土体的抗风蚀能力变化。这些工作为土壤风蚀力学过程研究奠定了基础，但现有风险评估模型中尚未涉及土壤力学参数。

近年来，学者们多采用径向基函数神经网络模型[7-8]、T-S模糊神经网络模型[9]、FCM模糊聚类[10]和层次分析法[11-12]与地理信息技术(GIS)结合的方法，进一步发展风险评估模型。然而，风与土壤颗粒的相互作用是一个动力过程，其影响因子众多，包括土壤粒度组成、团聚体含量、土壤含水率、植被覆盖

收稿日期： 2022-06-30； **修订日期：** 2022-08-09

基金项目： 国家重点研发计划(2020YFA0608404)；国家自然科学基金项目(41971011)资助

作者简介： 吴盈盈(1997-)，女，硕士研究生，主要从事风沙物理与治沙工程研究. E-mail: wuyingying20@mails.ucas.ac.cn

和风场强度等，各因子之间又存在着相互作用与制约的复杂关系。因此，基于土壤风蚀力学过程选取关键的监测指标进行风险评估，对大尺度区域的土壤风蚀研究具有重要意义。针对现有风险评估模型中缺乏力学参数这一现状，本文在野外实测土壤力学性质的基础上，利用GIS技术分析其空间特征，尝试通过建模将其纳入风蚀评估指标体系。河套平原因靠近黄河及其支流，绿洲灌溉农业发展历史悠久。其西部与乌兰布和沙漠接壤，南临库布齐沙漠，沙源丰富、降水稀少，对气候变化和人类活动具有较高的敏感性，也是干旱、大风和沙尘暴频发的多灾地带。因此，加强对该区域的土壤风蚀风险评估，了解土壤风蚀发生的具体范围和危险等级，可为绿洲的农业生产和风蚀防治提供理论依据。

1　研究区概况

河套平原(40°10′~41°20′N，106°25′~112°00′E)位于内蒙古自治区西南部，北至阴山南麓，南至鄂尔多斯高原北缘，西与乌兰布和沙漠紧邻，东接蛮汉山山前丘陵，总面积约2.97×10⁴ km²。研究区北面和东面界线明显，利用遥感影像进行划分；南边界线较模糊，故将南界靠近库布齐沙漠。研究区属温带大陆性季风气候，干旱少雨、生态环境脆弱，年蒸发量达2000~2400 mm，年平均气温5.6~7.8 ℃，降雨主要集中于夏季且自东向西递减，年降雨量130~400 mm。该区域盛行西风和西北风，风季横跨冬春为每年11月至来年5月[13]，年平均风速2.5~5.0 m·s^{-1}。河套地区主要的土地利用类型除耕地、林地、草地外，还有大片易发生风蚀和荒漠化的沙地，土壤以风沙土、灌淤土、盐土、潮土和栗钙土为主，是典型的农牧交错带和风蚀沙化区[14]。

本研究于2021年10月中旬对河套平原进行野外调查，按照土地利用类型选择测量点，使用TT-VS3m型便携式十字板剪切仪、SYS-TYD-1指针式土壤硬度计和SYS-YF原位土壤水分测定仪测量抗剪强度、土壤硬度和土壤含水率，测量点如图1所示。

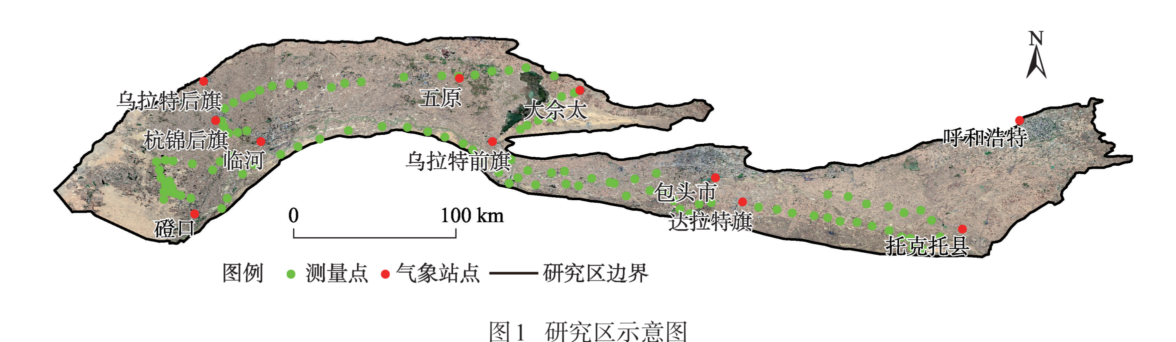


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

2　数据与方法

2.1　数据来源

基于土壤风蚀动力学理论，邹学勇等[3]将风蚀影响因素归纳为风力侵蚀因子、粗糙干扰因子和土壤抗蚀因子，并据此建立了概念模型。为提高模型的普适性，降低风蚀研究的复杂性，本文对影响风蚀的各种因素进行分析、选择与综合，最终选取风蚀气候侵蚀力、植被盖度、土壤含砂量、土壤可蚀性和地形起伏度5个指标建立风险评估模型。

气象数据由中国气象数据网(http://data.cma.cn)下载获得，包括乌拉特前旗、乌拉特后旗、托克托县、五原、磴口、大佘太、达拉特旗、呼和浩特、包头市、杭锦后旗和临河11个站点。月度归一化植被指数(NDVI)数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)，空间分辨率为1 km。土壤质地数据由国家科技资源共享服务平台国家地球系统科学数据中心土壤分中心(http://soil.geodata.cn/)下载获得。在地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)中下载30 m空间分辨率的ASRER GDEM数据。

2.2　风蚀气候侵蚀力

风沙活动强度常用输沙势和风蚀气候侵蚀力表征，其中输沙势能代表区域潜在输沙能力[15]，但

在较大空间尺度上,受沙粒粒径和植被盖度影响,起动风速难以确定。风蚀气候侵蚀力不仅可以度量气候对土壤风蚀的影响程度,更是评估区域风蚀气候条件的重要指标[16]。区域气候条件是风蚀产生的潜在动力,其对风蚀的影响不光表现在风力上,而是包括风速、降水、气温和相对湿度等多个气象要素在内的综合反映[17]。采用联合国粮农组织改进的公式计算风蚀气候侵蚀力:

$$C=\frac{1}{100}\sum_{i=1}^{12}\bar{u}_i^3\left(\frac{ETP_i-P_i}{ETP_i}\right)d \tag{1}$$

式中:C 为风蚀气候侵蚀力;$\bar{u}_i$、ETP_i 和 P_i 分别为第 i 月 2 m 高处平均风速($m\cdot s^{-1}$)、潜在蒸发量(mm)和降水量(mm);d 为每月天数。

式(1)中的 $\bar{u}_i$ 需要与气象站观测的 10 m 高处风速进行换算,换算公式如下[18]:

$$u_2=u_{10}\frac{4.87}{\ln(67.8\times10-5.42)} \tag{2}$$

式中:u_2、u_{10} 分别为 2 m 和 10 m 高度处风速($m\cdot s^{-1}$)。

月潜在蒸发量采用下式计算:

$$ETP_i=0.19(20+T_i)^2(1-r_i) \tag{3}$$

式中:T_i、r_i 分别为月平均气温(℃)、月平均相对湿度(%)。

首先计算1—5月风蚀气候侵蚀力的总和,然后取2016—2020年平均,并采用薄盘光滑样条插值法进行空间插值。

2.3 植被盖度

植被通过覆盖地表增大空气动力学粗糙度,减弱风力对地表的直接吹蚀,以及阻挡沙尘输运等形式保护地表,是抑制土壤风蚀的重要因素。NDVI能较好地反映地表植被覆盖程度,其值愈大说明植被生长越茂盛,覆盖率愈高。因冬、春季节干燥多风,沙尘灾害频发,前人多采用1—5月植被指数的平均值或最大值来代表某区域植被状况[7,9-11]。当植被盖度达到40%时[19],基本可以防治固定沙地的土壤风蚀。若以防风固沙和修复退化土地为目标,15%至25%的人工成林盖度可以确保完全固定流沙和树木健康成长[20]。基于此,本文运用最大值合成每年1—5月的NDVI,然后取2016—2020年的平均值来表征该区域的植被盖度,并将临界植被盖度界定为30%。

2.4 土壤含砂量

根据土壤粒度分布状况,可将土壤分为砂土、壤土和黏土。同等风速条件下,砂土比黏土等细质地土壤更容易被风蚀,因为细颗粒易于聚集并形成团聚体,能够提升土壤抵抗风蚀的能力[21]。另一方面,风蚀并不单指气流对土壤的作用,挟沙气流对表土冲击碰撞的侵蚀强度远大于无沙气流。跃移不仅是沙粒运动的主要方式,跃移颗粒的磨蚀、溅射更是粉尘释放的主要机制。土壤表层砂粒作为跃移颗粒的主要物质源,其含量高低与风沙危害严重程度密切相关。故将表层土壤砂粒(粒径范围0.05~2 mm)含量单独作为一项指标用于土壤风蚀研究。

2.5 土壤可蚀性

土壤硬度是衡量土壤破坏强度、抵抗压缩变形和摩擦阻力大小的指标[22],其受土壤孔隙度、土壤质地和水分含量等因素影响。土壤抗剪强度是土体发生剪切破坏前土壤所能承受的最大剪应力[23-24],体现了土壤颗粒之间的粘结程度。抗剪强度被认为是表征土壤抗风蚀能力的重要力学指标[3,6]。理论模型[25-26]和模拟实验[27]表明,干燥致密土壤在沙粒碰撞磨蚀下的侵蚀速率大致正比于其强度的负二次方,因此抗剪强度的负二次方能够代表土壤可蚀性的大小。

2.6 地形起伏度

地形主要通过扰动气流引起风速的空间变化而影响风蚀特征[28]。地势光滑平坦区域比崎岖陡峭区域遭受着更为剧烈的土壤风蚀,因为后者地表粗糙度大,增强了地表抵抗风蚀的能力。地形起伏度是描述区域地形特征的宏观指标。在一些研究中[9,11],常采用数字高程模型(DEM)求出一定范围内的最大值和最小值,然后将其差值作为地形起伏度的值。本文首先将DEM数据的分辨率重采样为1 km,通过计算25 km^2内的高差来获取地形起伏度。

2.7 土壤风蚀风险模型构建

本文使用模糊逻辑算法来计算各指标对风蚀的敏感性。模糊集是没有明显边界的集合,其特征是模糊隶属函数,范围从0.0到1.0。通过定义模糊隶属函数来评估每个像元发生风蚀的可能性,没有风蚀的可能性被指定为0,1则表示可能性最大[29-30]。常用的模糊隶属函数有3种:S形、J形和线形函数。就植被盖度而言,在0~30%的植被覆盖范围内,随着植被盖度增加,发生土壤风蚀的可能性降低,即植被对风蚀的敏感性降低,因此定义了单调递减的S形函数(图2a)。依据影响因子与风蚀

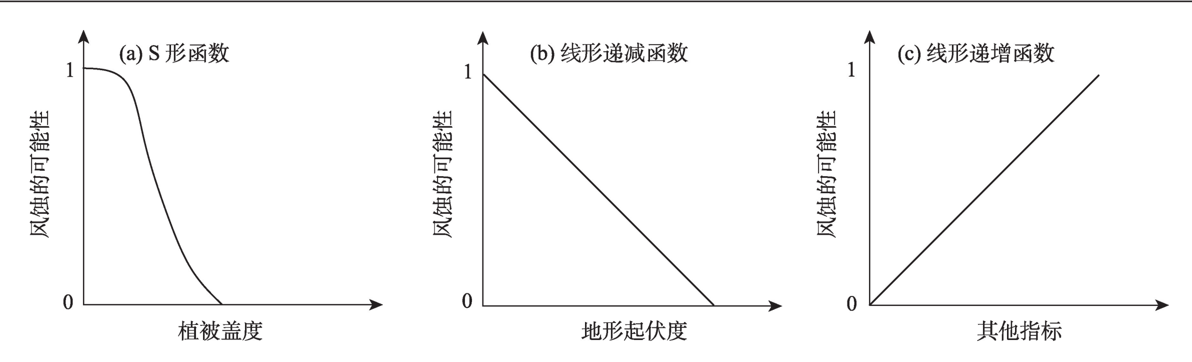


图2 模糊隶属函数

Fig. 2 Membership functions

之间的关系，其他指标如气候侵蚀力[30-32]和土壤可蚀性[30,32]等均采用线形函数计算。

风蚀影响因子权重使用层次分析法确定。层次分析法能够将专家经验判断定量化，是一种定量和定性相结合、系统化、层次化的综合评价方法[11-12,33]。该方法的关键是将各指标进行两两比较，用1~9的等级标度构造指示各指标相对重要性的判断矩阵，通过计算判断矩阵的主特征向量得出权重值。之后，还需要计算矩阵的一致性指数并对其检验。当一致性指数小于0.1时，说明判断矩阵和权重科学合理，否则需要重新构造判断矩阵，直至通过一致性检验。在野外考察与综合多位学者[11-12,33-35]研究的基础上，判断各风蚀影响因子之间的重要程度，并构造判断矩阵(表1)。其中，判断矩阵的一致性指数为0.0，远小于0.1，表明指标权重科学合理。由风蚀气候侵蚀力的计算公式可知，该指标并不单指风力，而是区域气候条件的综合体现，因而该指标权重较低。

表1 土壤风蚀影响因子判断矩阵

Fig. 1 Judgement matrix of influencing factors of soil wind erosion

风蚀指标	土壤可蚀性	植被盖度	土壤含砂量	风蚀气候侵蚀力	地形起伏度	权重
土壤可蚀性	1	1	2	7	9	0.3629
植被盖度	1	1	2	7	9	0.3629
土壤含砂量	1/2	1/2	1	3	5	0.1792
风蚀气候侵蚀力	1/7	1/7	1/3	1	2	0.0587
地形起伏度	1/7	1/9	1/5	1/2	1	0.0430

目前大多采用因子连乘或者相加的方法构建风蚀模型，乘法模型考虑更多的是因子之间的相互作用，加法模型则是因子作用的累积[36]。在本研究中，选取加权线性组合方法将各因子进行叠加，其计算公式为：

$$R=\sum_{i=1}^{n}w_i b_i \quad (4)$$

式中：R为土壤风蚀风险指数；w_i为第i个风蚀因子权重；b_i为第i个风蚀因子模糊值。

参照已有研究[14]和野外实地调查结果，将河套平原土壤风蚀风险划分为轻险型、危险型、强险型和极险型4个等级。

3 结果与分析

3.1 土壤可蚀性

作为一个综合的力学指标，土壤硬度在一定程度上影响着土壤风蚀过程。一般而言，表层土壤硬度越大越不容易发生风蚀。箱线图主要使用中位数和四分位数描述数据整体特征，可以不因离群点影响而导致数据整体偏移。由图3a可知，各组土地利用类型的土壤硬度值分布较集中，只有极少数的离群数据。其中，盐碱地的土壤硬度中值最高，为12.83 $kg\cdot cm^{-2}$，玉米地、林地和草地的土壤硬度中值相近，分别为8.14 $kg\cdot cm^{-2}$、8.82 $kg\cdot cm^{-2}$和8.15 $kg\cdot cm^{-2}$，

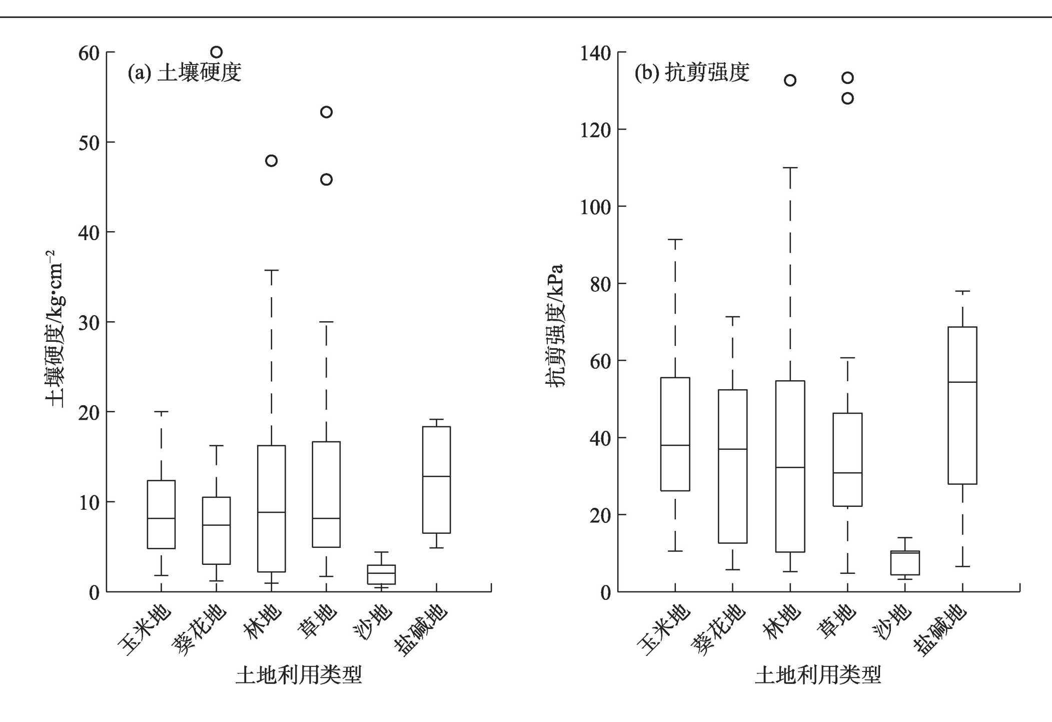


图3 不同土地利用类型的土壤硬度和抗剪强度

Fig. 3 Soil hardness and shear strength of different land use types

葵花地的土壤硬度中值(7.40 kg·cm^{-2})较低,沙地的土壤硬度中值远远小于其他土地利用类型,仅为2.05 kg·cm^{-2}。其原因可能是,风沙土黏粒含量和水分含量较低,土壤颗粒间胶结较弱,从而减小了土壤硬度。

不同土地利用类型的抗剪强度如图3b所示,其相对大小与土壤硬度具有较好的一致性。盐碱地的抗剪强度中值为54.33 kPa,耕地的抗剪强度中值为37~38 kPa,略高于林地(32.21 kPa)和草地(30.83 kPa)。耕地抗剪强度中值(37.50 kPa)是沙地(10.00 kPa)的3.75倍。并且,玉米地和葵花地两者抗剪强度的中值差别不大。据此,本文以抗剪强度中值的负二次方表征土壤可蚀性。在野外测量中采用原位法测定表土含水率,其绝对数值偶有偏差,但仍可定性比较不同土地类型的含水率。如表2所示,平均土壤含水率从小到大依次为沙地、草地、耕地、林地和盐碱地,与抗剪强度大致呈正相关。这些结果还表明,耕作灌溉、发展绿洲农业能明显提高土壤抵抗风蚀的能力,与Fallahzade等[23]的结论一致。Fallahzade等[23]发现农业开发将原始沙漠转变为灌溉农田后,农田土壤的抗剪强度远高于荒漠。并且,已有研究[24,37-39]表明植物根系、土壤含水量、有机质含量和土壤粒径分布等对土壤抗剪强度有显著影响。Zhang等[24]和Khaboushan等[37]更是建立了以上述土壤属性为自变量的统计学函数方程来估算表土抗剪强度,为土壤抗风蚀能力研究奠定了基础。

表2 不同土地利用类型的土壤可蚀性

Fig. 2 Soil erodibility of different land use types

土地利用类型	土壤含水率/%	抗剪强度中值/kPa	可蚀性指数/m^4·(kN)$^{-2}$
草地	15.21	30.83	0.001025
林地	17.65	32.21	0.000964
耕地	17.48	37.50	0.000711
沙地	7.77	10.00	0.010000
盐碱地	61.95	54.33	0.000339

3.2 风蚀风险评估

各风蚀影响因子的空间分布由图4给出,不再具体分析。土壤风蚀风险如图5所示,其在空间上大致呈"西部、南缘高,中、东部较低"的特征。由表3可知,风险等级主要以轻险型和危险型为主。

风蚀极险型大致呈片状分布,面积为2974 km^2,约占研究区总面积的9.99%。该区主要分布在磴口县大部、黄河南岸边缘以及乌拉特前旗境内乌梁素海的东部,其中磴口县西部与乌兰布和沙漠接壤,黄河南岸与库布齐沙漠紧邻,乌梁素海东部分布有大片裸露的沙地,缺乏植被庇护,表层土壤松散,土壤含水量极低。由前述可知,沙地的抗剪强度远远

(a) 植被盖度
图例
植被敏感性
高: 1
低: 0
N
0　100 km

(b) 地形起伏度
图例
地形敏感性
高: 1
低: 0
N
0　100 km

(c) 土壤含砂量
图例
细砂敏感性
高: 1
低: 0
N
0　100 km

(d) 土壤可蚀性
图例
土壤敏感性
高: 1
低: 0
N
0　100 km

(e) 风蚀气候侵蚀力
图例
气候敏感性
高: 1
低: 0
N
0　100 km

图4　河套平原风蚀指标敏感性

Fig. 4　Sensitivity of wind erosion indices in Hetao Plain

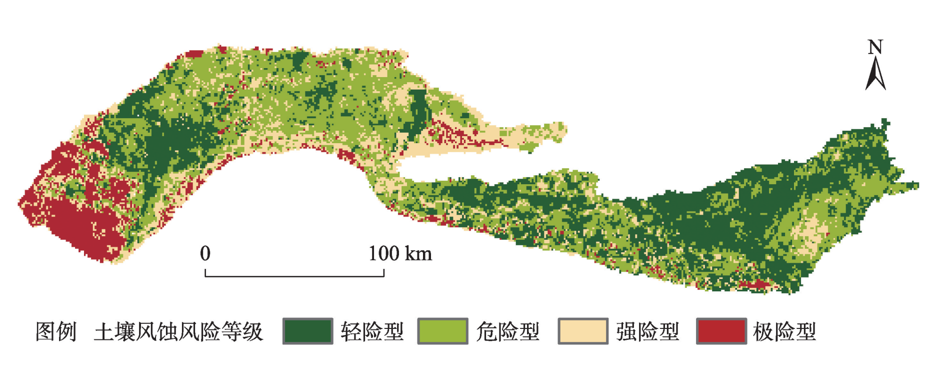


图5　河套平原土壤风蚀风险评价结果

Fig. 5　Assessment result of soil wind erosion risk in Hetao Plain

表3 土壤风蚀风险分级

Fig. 3 Classification of soil wind erosion risk

风蚀风险等级	土壤风蚀风险评估指数	面积/km²	比例/%
轻险型	<0.266	9774	32.84
危险型	0.266~0.400	11800	39.65
强险型	0.400~0.641	5214	17.52
极险型	>0.641	2974	9.99

小于其他土地利用类型，土壤可蚀性极高。磴口县（1—5月）的风蚀气候侵蚀力较高，平均约为12.59，年均降水量稀少，仅为164.8 mm，并且多集中于夏秋季。该区地势平坦，在气候条件影响下，风沙活动强烈。

风蚀强险型分布较零散，面积为5214 km²，约占研究区总面积的17.52%。该区主要分布在托克托县、乌拉特前旗、黄河两岸以及极险型外围，主要的土地利用类型为耕地、草地和未利用地。托克托县近5 a的1—5月平均风蚀气候侵蚀力约为11.14，对气候变化较敏感。乌拉特前旗东部土壤类型以风沙土为主，植被盖度和土壤抗剪强度均较低。黄河两岸在河水的冲刷和搬运作用下，分布有大片的冲积平原，地形起伏度小，且土壤含砂量较高。该区冬春季节地表干燥，植被稀疏，风力强劲，导致风蚀灾害极易发生。

风蚀危险型分布范围较广，面积为11800 km²，约占研究区总面积的39.65%。该区主要分布在河套灌区西部的杭锦后旗和五原县以及乌拉山麓以南的三湖河平原。杭锦后旗和五原县的风蚀气候侵蚀力分别为11.66和10.10，土壤类型以灌淤土和盐土为主，土壤含砂量低。其中，灌淤土土层深厚，土壤肥沃，有利于农作物生长；但同时也因人类对该区不断开垦，耕作灌溉，土壤强烈积盐使得盐渍化问题严重。三湖河平原背靠乌拉山，面朝黄河，引黄灌溉更为便利，植被盖度也较高，土壤类型以潮土、栗褐土为主，土质较好，因此本区风蚀风险中等。

风蚀轻险型区域的总面积为9774 km²，约占研究区总面积的32.84%，主要分布在临河区、包头市和呼和浩特之间的土默川平原。该区土地利用类型以耕地和草地为主，表土抗剪强度较高。临河区植被茂盛，并且风蚀气候侵蚀力较低，仅为8.84。土默川平原年均降水量约为408 mm，较为充沛，成土母质多为黄河冲积物，土壤类型以潮土和新积土为主，土壤含砂量较低，故其对风蚀的敏感性较低。总体而言，较高的植被盖度、较低的土壤含砂量和较弱的风蚀气候敏感性（图4）是本区风蚀风险较低的有利条件。

4 讨 论

目前，关于河套平原土壤风蚀风险评价的研究较少，故而通过与其他相关研究对比以验证评价结果的准确性。与邢丽珠等[14]采用RWEQ模型计算巴彦淖尔市土壤风蚀模数相比，本文风蚀极险型的空间分布与其2010年土壤风蚀强度为强烈和剧烈区域相一致，主要分布在磴口县和乌拉特前旗境内。张扬等[40]还曾选择风沙防治重点区磴口县来验证RWEQ模型精度，其结果表明，5月沙地与玉米地的实测风蚀量分别高达623.5 g·m^{-2}和104.2 g·m^{-2}。杜鹤强等[13]根据黄河上游宁蒙河段沙粒起动风速的空间分布判断，乌兰布和沙漠与库布齐沙漠西部地区的风蚀风险极大，其余高风险区均临近黄河。然而，师华定等[7]通过建立径向基函数神经网络模型评价内蒙古自治区土壤风蚀危险度的结果显示，磴口县、临河区和托克托县为强度风险区，包头市、五原县和杭锦后旗为极强风险区。两者间的差异可能在于：（1）该研究以市、县为基本单位，数据精度和空间分辨率较低，没有精确监测土壤风蚀影响因子；（2）与本文之间的时间跨度较大。在全球气候以变暖为主要趋势的背景下，干旱灾害频发，土地荒漠化加剧，导致局部区域的土壤风蚀风险日益增加。

为了弥补当前风蚀模型缺乏土壤力学参数这一现状，本文通过引入抗剪强度来完善土壤风蚀风险评估体系，从而对河套平原土壤风蚀风险进行准确评价。此外，考虑到风蚀是一个力学过程，模型还应包括更多的土壤风蚀动力学参数，如风力侵蚀力、地表粗糙度等。由于风蚀过程复杂，气候变化和人类活动因均会对其产生显著影响，为了更好理解风蚀风险变化过程，提高评估精度，进一步的研究目标应包含对未来气候的预估和对土地利用变化的情景模拟。

5 结 论

本文根据野外实测的土壤硬度和抗剪强度数

据，对不同土地利用类型的土壤可蚀性进行分析。从土壤风蚀影响因子角度出发，选取植被盖度、地形起伏度、土壤含砂量、土壤可蚀性和风蚀气候侵蚀力5个指标，结合模糊逻辑、层次分析法以及加权线性组合法，建立土壤风蚀评价模型，分析不同等级风险区的空间分布特征及影响因素。主要结论如下：

（1）不同土地利用类型的土壤可蚀性差异显著。林地、草地、耕地和盐碱地的抗剪强度中值分别为32.21 kPa、30.83 kPa、37.50 kPa和54.33 kPa，而沙地仅为10.00 kPa，远小于其他土地利用类型，土壤可蚀性极高。

（2）河套平原土壤风蚀风险的空间分异性显著，在空间上大致呈“西部、南缘高，中、东部较低”的特征，风蚀风险以危险型和轻险型为主，土壤可蚀性和植被盖度是影响土壤风蚀的重要因素。

（3）风蚀极险型和强险型的面积分别为2974 km^2 和5214 km^2，各占研究区总面积的9.99%和17.52%，主要分布在磴口县大部、黄河两岸、托克托县以及乌拉特前旗境内的乌梁素海东部，沙源物质丰富，植被盖度和土壤抗剪强度均较低，风沙危害剧烈，在此建立有效的区域综合防护体系是土壤风蚀防治的重点。

致 谢：中国科学院西北生态环境资源研究院牛改红硕士协助完成野外工作，谨致谢忱。

参考文献(References)

[1] 董光荣, 李长治, 金炯, 等. 关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J]. 科学通报, 1987, 32(4): 297-301. [Dong Guangrong, Li Changzhi, Jin Jiong, et al. Some results of wind tunnel simulation experiment on soil wind erosion[J]. Chinese Science Bulletin, 1987, 32(4): 297-301.]

[2] 陈渭南, 董光荣, 董治宝. 中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 1994, 9(5): 6-12. [Chen Weinan, Dong Guangrong, Dong Zhibao. Achievements and needs of studies on wind erosion in northern China[J]. Advances in Earth Science, 1994, 9(5): 6-12.]

[3] 邹学勇, 张春来, 程宏, 等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 875-889. [Zou Xueyong, Zhang Chunlai, Cheng Hong, et al. Classification and representation of factors affecting soil wind erosion in a model[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(8): 875-889.]

[4] 南岭, 杜灵通, 展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. 土壤, 2014, 46(2): 204-211. [Nan Ling, Du Lingtong, Zhan Xiuli. Advances in study on soil erodibility for wind erosion[J]. Soils, 2014, 46(2): 204-211.]

[5] 李晓佳, 海春兴, 刘广通. 阴山北麓不同用地方式下春季土壤可蚀性研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 926-932. [Li Xiaojia, Hai Chunxing, Liu Guangtong. Spring soil erodibility for different land use patterns in the north piedmont of the Yinshan Mountains [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(6): 926-932.]

[6] 李驰, 黄浩, 孙兵兵, 等. 沙漠路基边坡抗风蚀能力现场试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊2): 220-225. [Li Chi, Huang Hao, Sun Bingbing, et al. Field test study on the anti-wind erosion ability for desert roadbed slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Suppl. 2): 220-225.]

[7] 师华定, 高庆先, 庄大方, 等. 基于径向基函数神经网络(RBFN)的内蒙古土壤风蚀危险度评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 129-133. [Shi Huading, Gao Qingxian, Zhuang Dafang, et al. Using RBFN model and GIS technique to assess wind erosion hazard in Inner Mongolia[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(5): 129-133.]

[8] 杨光华, 包安明, 陈曦, 等. 基于RBFN模型的新疆土壤风蚀危险度评价[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1137-1145. [Yang Guanghua, Bao Anming, Chen Xi, et al. Wind erosion hazard assessment in Xinjiang based on RBFN model[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5): 1137-1145.]

[9] 刘新颜, 曹晓仪, 董治宝. 基于T-S模糊神经网络模型的榆林市土壤风蚀危险度评价[J]. 地理科学, 2013, 33(6): 741-747. [Liu Xinyan, Cao Xiaoyi, Dong Zhibao. Soil wind erosion risk assessment in Yulin City using T-S fuzzy neural network model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(6): 741-747.]

[10] 师华定, 高庆先, 齐永清, 等. 蒙古高原土壤风蚀危险度的FCM模糊聚类研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 881-889. [Shi Huading, Gao Qingxian, Qi Yongqing, et al. Wind erosion hazard assessment of Mongolian Plateau by using FMC fuzzy cluster method[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(5): 881-889.]

[11] 曹晓仪, 董治宝, 李静, 等. 基于GIS的榆林市土壤风蚀危险度评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 206-210. [Cao Xiaoyi, Dong Zhibao, Li Jing, et al. GIS-based evaluation of soil erosion risk by wind in Yulin City of Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 206-210.]

[12] 孙传龙, 张卓栋, 邱倩倩. 基于层次分析法的锡林郭勒草地景观系统风蚀危险性分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1036-1042. [Sun Chuanlong, Zhang Zhuodong, Qiu Qianqian. AHP based wind erosion risk analysis of the Xilinguole grassland landscape system[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(5): 1036-1042.]

[13] 杜鹤强, 薛娴, 王涛. 黄河上游宁夏-内蒙古段跃移沙粒起动风速的空间分布[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 210-219. [Du Heqiang, Xue Xian, Wang Tao. Spatial distribution of threshold wind velocity for sand saltation in Ningxia-Inner Mongolia reach of upstream of Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 210-219.]

[14] 邢丽珠, 张方敏, 邢开成, 等. 基于RWEQ模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5):

111-119. [Xing Lizhu, Zhang Fangmin, Xing Kaicheng, et al. Change of soil wind erosion and attribution in Bayannur, Inner Mongolia based on the revised wind erosion equation[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 111-119.]

[15] 张正偲, 董治宝, 赵爱国, 等. 输沙量与输沙势的关系[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 824-827. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao, Zhao Aiguo, et al. Relationship between sand transport and sand drift potential[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 824-827.]

[16] 陈首序, 董玉祥. 风蚀气候侵蚀力研究进展[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 65-73. [Chen Shouxu, Dong Yuxiang. A review of the research on wind erosion climatic erosivity[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 65-73.]

[17] 王永, 赵举, 程玉臣. 阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 华北农学报, 2005, 20(增刊1): 57-60. [Wang Yong, Zhao Ju, Cheng Yuchen. Analysis of wind erosion climatic erosivity at agri-pasture transition zone in north area of Yinshan Mountain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2005, 20(Suppl. 1): 57-60.]

[18] 刘慧, 李晓英, 肖建华, 等. 1961—2015年雅鲁藏布江流域风蚀气候侵蚀力变化[J]. 地理科学, 2019, 39(4): 688-695. [Liu Hui, Li Xiaoying, Xiao Jianhua, et al. Variations of wind erosion climatic erosivity in the Yarlung Zangbo River Basin during 1961—2015 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(4): 688-695.]

[19] 王翔宇, 原鹏飞, 丁国栋, 等. 不同植被覆盖防治土壤风蚀对比研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 38-41. [Wang Xiangyu, Yuan Pengfei, Ding Guodong, et al. Study on mechanism between natural shrub-grass and soil wind erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(5): 38-41.]

[20] 杨文斌, 李卫, 党宏忠, 等. 低覆盖度治沙——原理、模式与效果[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [Yang Wenbin, Li Wei, Dang Hongzhong, et al. Desertification control with low coverage vegetation: Principle, mode and effect[M]. Beijing: Science Press, 2016.]

[21] 胡孟春, 刘玉章, 乌兰, 等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(1): 25-32. [Hu Mengchun, Liu Yuzhang, Wu Lan, et al. A experimental study in wind tunnel on wind erosion of soil in Korqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 1991, 11(1): 25-32.]

[22] 杨望, 张硕, 杨坚, 等. 收获期木薯地耕作层土壤硬度的试验研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 176-180. [Yang Wang, Zhang Shuo, Yang Jian, et al. Experimental study on soil hardness of cultivated horizon at cassava cultivated farm in harvesting period[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 176-180.]

[23] Fallahzade J, Karimi A, Naderi M, et al. Soil mechanical properties and wind erosion following conversion of desert to irrigated croplands in central Iran[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104665, doi: 10.1016/j.still.2020.104665.

[24] Zhang C, Wang X, Zou X, et al. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 1-10.

[25] Wang Z T, Wang H T, Niu Q H, et al. Abrasion of yardangs[J]. Physical Review E, 2011, 84(3): 031304, doi: 10.1103/PhysRevE.84.031304.

[26] Wang Z T. Erosion model for brittle materials under low-speed impacts[J]. Journal of Tribology, 2020, 142(7): 074501, doi: 10.1115/1.4046019.

[27] 吴盈盈, 刘旭阳, 王振亭. 干燥致密土壤在沙粒流冲击下的磨蚀规律[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 315-320. [Wu Yingying, Liu Xuyang, Wang Zhenting. Abrasion law of dry and dense soil under the bombardment of sand grain flows[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(8): 315-320.]

[28] 李振山. 地形起伏对气流速度影响的风洞实验研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(4): 75-79. [Li Zhenshan. Wind tunnel simulation of flow velocity on the windward slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(4): 75-79.]

[29] Mirmousavi S H. Regional modeling of wind erosion in the north west and south west of Iran[J]. Eurasian Soil Science, 2016, 49(8): 942-953.

[30] Baumgertel A, Lukić S, Belanović Simić S, et al. Identifying areas sensitive to wind erosion: A case study of the AP Vojvodina (Serbia)[J]. Applied Sciences, 2019, 9(23): 5106, doi: 10.3390/app9235106.

[31] Mezősi G, Blanka V, Bata T, et al. Assessment of future scenarios for wind erosion sensitivity changes based on ALADIN and REMO regional climate model simulation data[J]. Open Geosciences, 2016, 8(1): 465-477.

[32] Borrelli P, Panagos P, Ballabio C, et al. Towards a pan-European assessment of land susceptibility to wind erosion[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(4): 1093-1105.

[33] 于国茂, 刘越, 艳燕, 等. 2000—2008年内蒙古中部地区土壤风蚀危险度评价[J]. 地理科学, 2011, 31(12): 1493-1499. [Yu Guomao, Liu Yue, Yan Yan, et al. Soil wind erosion risk assessment in the middle part of Inner Mongolia Plateau during 2000 to 2008[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(12): 1493-1499.]

[34] 胡孟春, 王周龙. 土壤风蚀的自然-社会复合系统动态过程模拟研究[J]. 科学通报, 1994, 39(12): 1118-1121. [Hu Mengchun, Wang Zhoulong. Study on dynamic process simulation of natural and social complex system of soil wind erosion[J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(12): 1118-1121.]

[35] 周颖, 曹月娥, 杨建军, 等. 准噶尔盆地东部土壤风蚀危险度评价[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1265-1270. [Zhou Ying, Cao Yue'e, Yang Jianjun, et al. Assessment of wind erosion hazard degree in the Zhundong area, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1265-1270.]

[36] Mihi A, Benaradj A. Assessing and mapping wind erosion-prone areas in northeastern Algeria using additive linear model, fuzzy logic, multicriteria, GIS, and remote sensing[J]. Environmental

Earth Sciences, 2022, 81(2): 1−21.

[37] Khaboushan E A, Emami H, Mosaddeghi M R, et al. Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 118−127.

[38] Feng B, Zong Q, Cai H, et al. Calculation of increased soil shear strength from desert plant roots[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(16): 1−12.

[39] Zhang B, Zhao Q G, Horn R, et al. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 59(3−4): 97−106.

[40] 张扬, 田美荣, 陈艳梅, 等. 基于RWEQ模型的磴口县沙地与耕地风蚀评价及验证[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(9): 95−102. [Zhang Yang, Tian Meirong, Chen Yanmei, et al. Evaluation and verification of wind erosion of sandy land and cultivated land in Dengkou County based on RWEQ model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(9): 95−102.]

Risk assessment of soil wind erosion in Hetao Plain

WU Yingying[1,2], WANG Zhenting[1]

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil wind erosion is the primary stage and important component of desertification in arid and semiarid regions. Evaluating its possibility and potential risk for wind erosion control at the regional level is of considerable importance. In recent years, remote sensing and geographic information technology are often combined with mathematical methods to build a risk assessment model. However, the current risk models of wind erosion are still lacking in mechanical parameters. This study was conducted in the Hetao Plain of China, which is a typical region of wind erosion and desertification. Soil hardness and shear strength were measured in the field to determine the difference in soil erodibility among different land use types. Wind erosion risk was evaluated using fuzzy logic, analytic hierarchy process, and the weighted linear combination method based on the data of climate conditions, soil physical factors, topography, and vegetation characteristics. Then, the spatial distribution characteristics and causes of different risk areas were analyzed. The following results are presented. (1) The shear strength of land use types shows an increased tendency in the order of sandy land, grassland, woodland, cultivated land, and saline land, which agreed well with the soil hardness. The soil hardness and shear strength of sandy land are 2.05 $kg\cdot cm^{-2}$ and 10.00 kPa, respectively, which are significantly lower than those of other land use types, indicating that the soil erodibility of sandy land is extremely high. (2) The wind erosion risk varied in spatial distribution. Wind erosion hazard is high in the west and south and low in the eastern and middle regions. Moreover, 27.51% of the total areas are found to be at a high risk of erosion. Thus, soil erodibility and vegetation coverage are essential factors affecting soil wind erosion. (3) The severe risk region is mainly distributed in most of Dengkou County, the edge of the south bank of the Yellow River, Togtoh County, and the east of Wuliangsuhai in the Urad Front Banner. Therefore, this area should be the focus of wind erosion control. The current research demonstrates strong universality and compensates for the shortcomings of existing wind erosion models, which can provide a theoretical basis for regional-scale wind erosion assessment models.

Key words: Hetao Plain; soil wind erosion; risk assessment; shear strength; fuzzy logic